

22Cr 린 듀플렉스 스테인리스강의 공식저항성에 미치는 Mn 과 Ni 첨가의 영향

Effect of Alloying Elements of Mn and Ni on the Pitting Corrosion Resistance of 22Cr Lean Duplex Stainless Steel

안용식*† · 배근국**

Y. S. Ahn*† and K. K. Bae**

(접수일 : 2012년 05월 25일, 수정일 : 2012년 07월 27일, 채택확정 : 2012년 08월 07일)

Key Words : Pitting corrosion resistance(점식저항), Duplex Stainless Steel(듀플렉스 강), Alloy composition(합금 성분)

Abstract : Duplex stainless steels have the dual microstructure of austenite and ferrite phases. This steel exhibits generally a high corrosion resistance and higher mechanical strength compared with austenitic stainless steels. The steels used in the investigation have the chemical composition of Fe-22Cr-xNi-yMn-0.2N in which the contents of Ni and Mn were varied with maintaining the equal [Ni/Cr] equivalent. The fraction of ferrite phase was increased with the increase of annealing temperature. The impact factor of Mn element on the [Ni] equivalent was amended on the basis of the results of the investigation. 4Mn-2Ni alloy showed the highest pitting corrosion resistance. The fraction ratio, grain size and misorientation angle between grains were measured, and the correlation with pitting potential was investigated.

1. 서 론

대규모 해수 처리 설비의 경제성 확보를 위하여 기존의 티타늄, Cu-Ni 튜브 등과 같은 고급 소재를 대체한 듀플렉스 스테인리스강, 슈퍼 스테인리스강 등의 사용이 확대되는 추세이다. 듀플렉스 스테인리스강은 낮은 열팽창계수를 가지며 신축이음과 열 사이클 조건에서 사용하기에 적합하며 열전도도와 기계적인 강도가 오스테나이트계 스테인리스강보다 높다. 따라서 원통형 압력용기같은 박육부품에 사용되며 또한 해수담수화 플랜트에 사용되는 담수 증발기에도 사용되고 있다.¹⁾ 듀플렉스 스테인리스강은 상온에서 오스테나이트 스테인리스강에 비해 2배 정도 높은 강도를 가지며 25 % 이상 높은 연신율을 나타낸다. 또한 이 강은 표면에 치밀한 산화피막을 형성시켜 부동태를 이루며 부식에 대한 저항성을 향상시

킨 합금이다. 듀플렉스 스테인리스강의 경우에는 그 미세 조직이 페라이트와 오스테나이트상으로 구성되어 있기 때문에 내식성은 상의 부피분율에 의해 크게 좌우 된다.²⁾ 스테인리스강은 염소이온과 같은 할로젠 이온이 존재하는 분위기에서 공식에 민감하며 스테인리스강의 공식 저항성은 틈부식 및 응력부식 균열과 같은 국부부식에 대한 저항성과도 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 있다.³⁾

린 듀플렉스 스테인리스강은 이상 스테인리스강의 일종으로 부식 저항성을 듀플렉스 스테인리스강의 수준으로 유지한 채 고가의 Ni를 절약할 목적으로 개발되었다. 이 강은 경우 수력발전댐, 다리, 잔교에 사용되고 있으며 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 우수한 부식 저항성을 가지며, 낮은 Ni함량 때문에 다른 강종에 비해 가격이 저렴하다. 이 강종은 타 강종에 비해 아직 연구개발이 덜 되어 있으며 적용

*† 안용식(교신저자) : 부경대학교 재료공학과
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6361

**배근국 : 부경대학교 재료공학과

*† Y. S. Ahn(corresponding author) : Department of Materials Science and Engineering, PuKyong National University.
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6361

**K. K. Bae : Department of Materials Science and Engineering, PuKyong National University

Table 1 Chemical composition of lean duplex stainless steels used (wt.%)

Composition(wt.%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
1) 4Mn-2Ni alloy	0.032	0.99	4.07	21.51	1.970	0.302	0.80	0.190	Bal.
2) 5Mn-1.5Ni alloy	0.031	1.01	5.03	21.47	1.500	0.307	0.81	0.201	Bal.
3) 6Mn-1Ni alloy	0.028	1.00	5.94	21.50	1.030	0.300	0.80	0.204	Bal.
4) 7Mn-0.5Ni alloy	0.027	0.99	7.00	21.58	0.493	0.308	0.80	0.202	Bal.
5) 8Mn-0Ni alloy	0.026	0.98	7.81	21.30	0.000	0.297	0.79	0.209	Bal.

후 사용현황에 대한 데이터가 아직 많이 부족한 상태이다. 특히 이 강종에 첨가되어 있는 Ni, Mn 및 N 원소의 적정함량에 대한 연구결과가 아직 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 22Cr-Ni-Mn-0.2N 린 듀플렉스 스테인리스강의 공식저항성에 미치는 Mn 과 Ni 원소의 영향에 대해서 연구하였다.

2. 시험 방법

시험에 사용된 시편은 22Cr 린 듀플렉스 스테인리스강을 기본으로 Mn과 Ni의 조성을 달리하면서 식(1)에서 나타내고 있는 $[Ni]_{eq}$ (Ni equivalent)⁴⁾가 일정한 상태를 유지하기 위해 Cr 및 C, N 함량은 동일한 상태에서 $[Ni]+0.5 \times [Mn]$ 의 함량이 항상 일정하도록 한 5개의 시험편을 제조하였다. 식에서 [] 표시는 해당 원소의 중량 %를 나타낸다. 각각의 시험편은 진공유도용해로에서 50 kg 잉곳으로 제조하였으며 제조된 잉곳은 1250 °C에서 2시간 동안 재가열한 후에 최종두께 3 mm가 되도록 1000 °C에서 열간압연하였다. 표 1에 시험편의 조성을 나타내었다.

$$[Cr]_{eq} = [Cr] + [Mo] + 1.5 \times [Si] \quad (1)$$

$$[Ni]_{eq} = [Ni] + 30 \times [C + N] + 0.5 \times [Mn]$$

동전위분극실험을 통한 공식전위 측정에 사용된 시편은 1 cm² 이상의 사각형으로 절단하여 시험편의 표층부를 사용하였다. 미세조직을 관찰하기 위해 연마 후 30 wt% KOH를 사용하여 4.10 mV, 1.8 A 조건에서 10초 동안 전해에칭하고 에탄올 세척 후 건조하였다. 각 시험편의 광학현미경 미세조직 관찰 시에는 이미지 분석 프로그램을 사용하여 상간거리를 측정하였다.

Mn과 Ni의 함량을 달리한 각 시험편에서 페라이트와 오스테나이트상이 나타나는 온도구간을 ThermoCalc를 통하여 계산하였으며, 6~9개 온도구간을 등간격으로 어닐링 열처리하였다. 열처리는 70~1100 °C 범위에서 목표온도에 도달 후 1시간 동

안 유지 후 수냉하였다.

페라이트 상분율을 측정하기 위해서 사용한 분석 방법은 모두 3가지의 방법 - Ferritescope(Fisher MP30), 광학현미경 사진의 이미지 분석과 EBSD - 을 택하였으며 각각의 결과를 비교해 봄으로써 시험 결과의 신뢰성을 비교할 수 있었다.

공식전위를 측정하기 위한 시험용액으로 3.5 % NaCl 이 사용되었다. 시험 전 용액은 질소가스를 이용해서 30분간 탈기하여 용존산소가 제거되었다. 시험에 사용된 장비는 Potentiostat/Galvanostat 273A 이며 Ag/AgCl Electrode 를 기준전극으로 3 전극계를 구성하였다. Flat Cell Kit에 시험편을 고정된 후 전류를 인가하여 얻어진 분극곡선을 통하여 공식전위를 측정하였다.

7Mn-0.5Ni 강 의 경우 750 °C 950 °C 1100 °C 어닐링 열처리 시험편을 이용하여 EBSD 분석을 하였으며 이를 통하여 시험편의 결정립 크기, 페라이트, 오스테나이트 상분율 및 각 상의 결정 방위각을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 어닐링 온도에 따른 페라이트 상분율의 변화

그림 1은 4Mn-2Ni alloy의 조성으로 ThermoCalc program을 사용하여 온도변화에 따른 각 상들의 평형 물분율의 변화를 나타내었다.

그림에서 보면 1000 °C~1200 °C 온도구간에서 δ 와 γ 의 2상만이 열역학적으로 안정한 상인 것을 알 수 있으며, 900 °C이하의 온도에서는 M₂₃C₆ 가 발생하고 그리고 800 °C이하에서는 σ 상이 나타나는 것을 알 수 있다. 약 900 °C이상에서는 온도가 올라감에 따라 페라이트(α) 상분율이 증가하며 반대로 오스테나이트(γ) 상분율은 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 2는 각 합금의 어닐링열처리 후 광학현미경 미세조직을 나타내고 있으며, 그림에서 보면 어두운

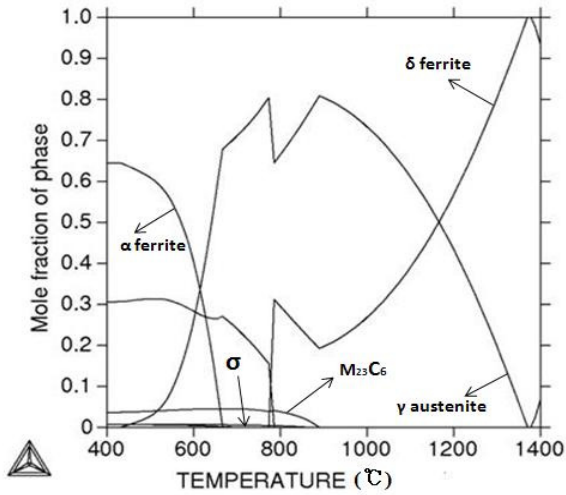


Fig. 1 Calculated equilibrium phase fractions for 4Mn-2Ni alloy versus temperature

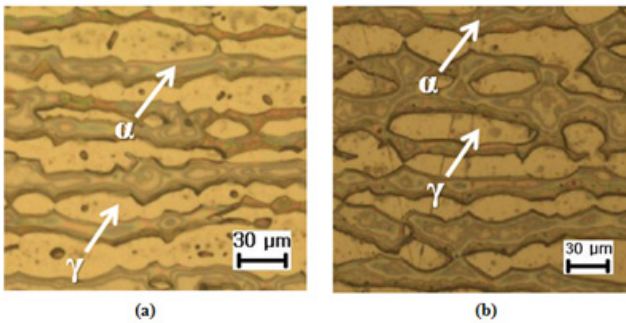


Fig. 2 Optical micrographs of (a) 4Mn-2Ni alloy annealed at 1000°C (b) 7Mn-0.5Ni alloy annealed at 1100°C

영역의 α-페라이트상과 밝은 영역의 γ-오스테나이트상이 규칙적으로 층을 이루고 있다. 그림의 (a), (b)는 α 상분율이 각각 36.8 %, 56.2 %로 나타났다.

그림 3은 어닐링 온도에 따른 α 상분율의 변화를 나타낸 것으로 5가지 시험편 모두에서 열처리 온도가 증가할수록 α 상분율이 증가하고 있다. 이는 그림 1에서 ThermoCalc를 통한 평형 몰분율의 변화에서 예측되었던 결과이다. 한편 5가지 시험편에 첨가한 Mn과 Ni의 영향을 보면 1번에서 5번으로 갈수록 페라이트 상분율이 전반적으로 증가하고 있다. 다시 말해서, Mn의 함량이 증가하고 Ni의 함량이 감소함에 따라 α 상분율이 증가하고 있다.

실제 본 연구에서 사용된 강종들은 합금설계 시 $[Ni]_{eq}$ 값이 일정하도록 Ni과 Mn의 함량을 조절하였다. 즉 Mn의 함량이 1 wt.% 증가할 때 Ni 함량은 0.5 wt.% 감소하도록 조성비를 조절하였다. Ni 및 Cr 당량이 같으면 미세조직에서 페라이트 상분율도

같아야 되나 본 연구결과에서는 그림 3에서 나타내는 바와 같이 다르게 나왔다.

동일한 열처리 온도에서 열처리한 결과를 비교할 때, α 상분율에서 3번 시험편은 1번 보다 평균 7 % 정도 높게 나타났으며, 이러한 상분율의 차이는 Schaeffler Diagram 상에서 $[Ni]_{eq}$ 값을 비교해보면 절대값의 차이가 0.45 가 된다.

본 연구결과를 근거로 Ni 당량에 미치는 Mn성분의 효과를 정확하게 계산하기 위해 α 상분율의 실험 값과 Schaeffler Diagram을 이용해서 Mn의 효과를 변수 y로 두고 Mn의 효과를 계산하여 수정된 $[Ni]_{eq}$ 식을 구하면 $y=0.4$ 이 되며 이것은 기존의 $[Ni]_{eq}$ 식에서 Mn의 효과가 $0.5 \times Ni$ 로 나타나는 것보다 더 작은 결과를 나타낸다. 즉 본 연구결과에 의해 수정된 Ni당량식은 아래와 같다.

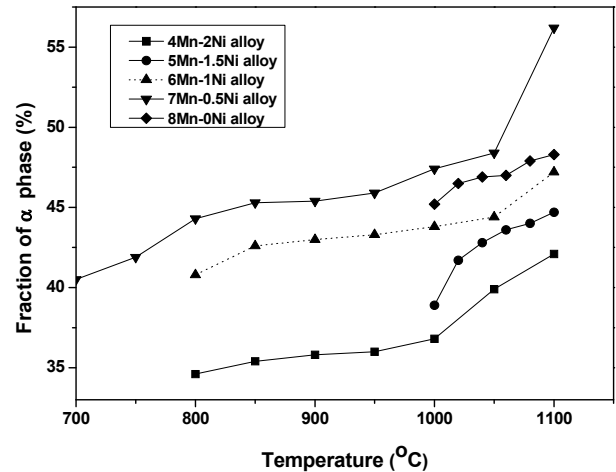


Fig. 3 Fraction of ferrite phase for each specimen vs. temperature

$$[Ni]_{eq} = [Ni] + 30 \times [C + N] + 0.4 \times [Mn] \quad (2)$$

이 식을 적용하면 그림 3에서 나타내는 각 강종의 α 상분율 차이가 정확하게 일치하게 된다. 즉 동일한 Ni당량을 가지기 위해서는 Ni을 Mn으로 치환할 때 Ni을 감소한 함량의 2배보다 더 많은 2.5배의 Mn을 첨가하여야 된다는 것이다.

3.2 공식전위에 미치는 페라이트 상분율의 영향

그림 4는 7Mn-0.5Ni alloy에서 어닐링 열처리 온도에 따른 분극곡선을 나타내며, 모든 분극곡선은 스테인리스강의 전형적인 형태를 나타내고 있다. 각 분극곡선에서 공식전위는 부동태 구간을 지나 부식전류 밀도(Current density)가 급격히 증가하는 지점의

전위를 말한다.

그림 5는 어닐링 열처리 온도에 따른 각 시험편의 공식전위를 나타낸다. 가장 높은 공식전위(pitting potential)를 나타내는 어닐링 열처리 온도가 시험편마다 다르며 공식전위는 일정한 온도까지 증가하다가 최고점을 이후로 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 모든 시험편에서 유사한 경향을 나타내었으며, 그 가장 큰 이유는 어닐링 열처리 온도에 따라 α 상분율이 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 모든 강종들은 열처리 온도 850 °C 이하에서는 매우 낮은 공식전위를 나타내다가, 이 온도 이상에서는 대체로 높은 공식전위를 나타내고 있다. 그 이유는 850 °C 이하에서 열처리 시 $M_{23}C_6$ 등의 석출물이 발생하였고 불완전한 어닐링에 의해 가공조직이 일부 내부에 남아있기 때문인 것으로 판단된다.

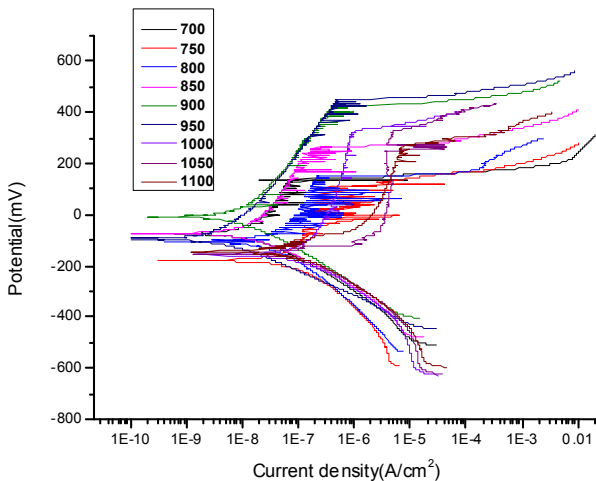


Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves of 7Mn-0.5Ni alloy with the increase of annealing temperature

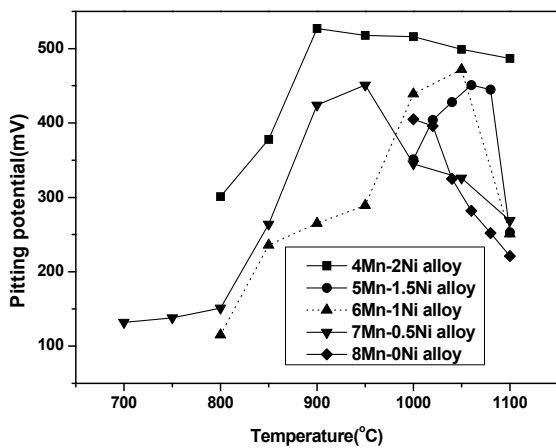


Fig. 5 Pitting potential of samples depending on the annealing temperature

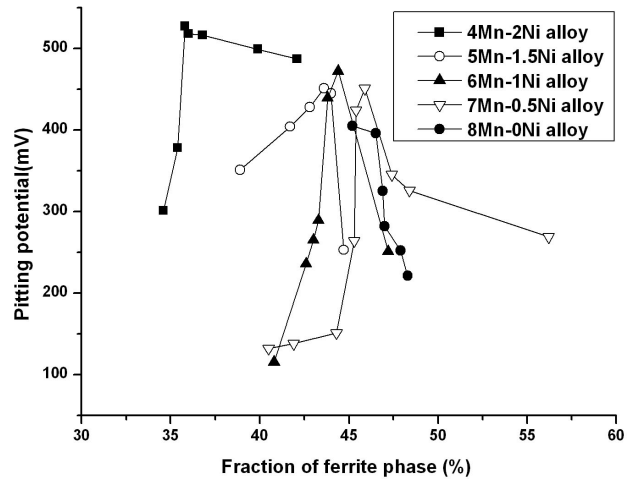


Fig. 6 Pitting potential depending on the the volume fraction of α phase

그림 6은 그림 5의 결과에서 각 시험편의 페라이트 상분율에 따른 공식전위 크기를 비교한 것이다. 그림에서 보면 4Mn-2Ni 합금을 제외하고는 모든 합금에서 최대 공식전위를 나타내는 페라이트 상분율이 44~46 %이라는 것을 알 수 있다. 4Mn-2Ni 합금의 경우 본 연구의 어닐링 온도 중 최대인 1100 °C에서 열처리 하였음에도 페라이트 상분율이 약 42 % 밖에 되지 못하였기 때문에, 페라이트 상분율이 그 이상일 때 발생하는 공식전위의 경향을 구할 수가 없었다. 두 그림에서 보면 전체적으로 4Mn-2Ni 합금의 공식전위가 다른 합금에 비해 상대적으로 높았으며, 다른 4가지 합금의 경우에는 서로 큰 차이를 나타내지는 않았으며, 공통적으로 페라이트 상분율이 44~46 %일 때 최대의 공식전위를 나타내고 있다. 실제 공식전위에 미치는 질소를 포함한 공식저항지수(Pitting Resistance Equivalent, PREN)에 관한 식⁵⁾은 아래와 같이 표현된다.

$$PREN = [Cr] + 3.3 \times [Mo] + 16 \times [N] \quad (3)$$

PREN 지수에 따르면 어닐링 열처리에 따른 페라이트 상분율의 변화가 공식저항성에 미치는 영향을 반영할 수 없다. 따라서, 다양한 어닐링 열처리 온도의 시험편에서 공식저항성을 비교평가하기 위해서는 공식전위에 영향을 주는 α 상분율 뿐만 아니라 또 다른 요인들에 대한 추가적인 실험과 분석이 필요하다. 본 연구에서 합금원소 첨가인자로 사용된 Ni과 Mn은 PREN지수에 포함되어 있지 않다. 그러나 이전의 보고에 의하면 Mn원소는 2 %이상 첨가 시 공식저항성을 저해하며 Ni원소도 첨가량이 증가할수록 공식저항성을 감소시킨다고 하였으나 본 연구결과와

는 일치하지 않는다. 4Mn-2Ni 합금이 높은 공식전위를 나타내는 이유를 분석하기 위해 동일한 온도 1000 °C에서 어닐링 처리한 각 강종들의 상간거리 (grain intercept length)등을 비교해 보았다.

표 2에서 보면 1번 합금인 4Mn-2Ni 합금의 상간거리가 가장 짧으며 공식전위도 가장 높다. 상간거리가 짧다는 것은 α/γ -상경계 밀도가 높다는 것을 의미하는데 실제 상경계 밀도가 높던지 결정립이 미세하면 그 경계부 및 결정립계에 공식이 발생할 수 있는 장소가 많으므로 공식저항성에 나쁜 영향을 준다. 따라서 상간거리가 짧은 합금의 공식전위가 높게 나타난 것은 타 연구결과⁶⁾와는 일치하지 않는다.

Table 2 Grain intercept length and pitting potential of the specimens annealed at 1000 °C

Specimen No.	1	2	3	4	5
Grain intercept length (μm)	17.4	33.7	30.3	30.7	31.3
Fraction of α phase (%)	36.8	38.9	43.8	47.4	45.2
Pitting Potential (mV)	516	351	439	345	405

Kwon 등⁷⁾은 듀플렉스 스테인리스강에서 Mn 함량이 6 % 이상이면 공식저항성이 급격히 저하한다고 하였다. 실제 본 연구에서도 Mn이 최대로 첨가되어 있는 8Mn 합금의 공식전위가 가장 낮았으나 앞의 연구에 의한 결과만큼 치명적으로 영향을 미치지 않았다.

3.3 공식전위에 미치는 입계에너지의 영향

4Mn-2Ni 합금을 제외하면 모든 시험편에서 α 상 분율이 증가함에 따라 공식전위는 증가하다가, α 분율이 약 45 %일 때 공식전위가 최대가 되고 그 이상 증가 시에는 역으로 감소하는 경향을 나타내었다.

공식전위에 영향을 주는 요인으로서 α/γ -상분율 이외에 또 다른 요인을 조사해 보았다. 그림 7은 7Mn-0.5Ni 합금에서 동전위분극실험 후 표면에서 발생한 pit를 나타내며 시험편의 EBSD 분석결과 결정립 크기가 평균 5 μm 이하 이므로 pit의 대부분이 α 와 γ 의 결정립계 또는 α/γ 상경계에서 발생하는 것을 알 수 있다.^{8,9)} (A)에서 검게 나타난 pit를 볼 수 있으며 (B)는 결정립계에서 pit들이 형성되었다. Pit의 형태와 분포는 불규칙하며 시간이 지남에 따라

그 크기가 증가하게 된다. 결정립계에서 시작된 pit가 시간이 경과됨에 따라 성장하고 서로 중첩되어 크게 성장한 형태(C)를 나타내고 있다.

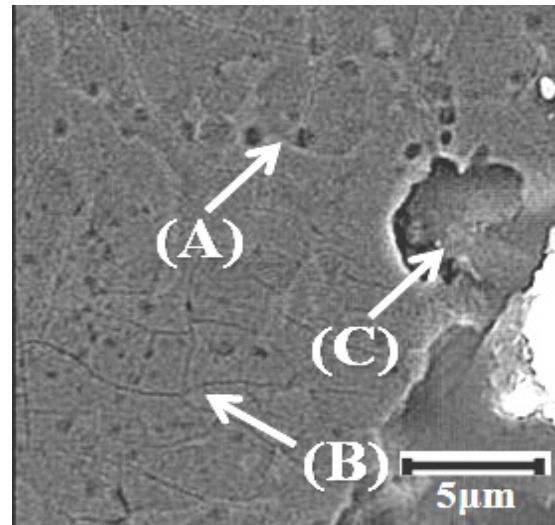


Fig. 7 View of intergranular pitting corrosion of 7Mn-0.5Ni alloy annealed at 900 °C

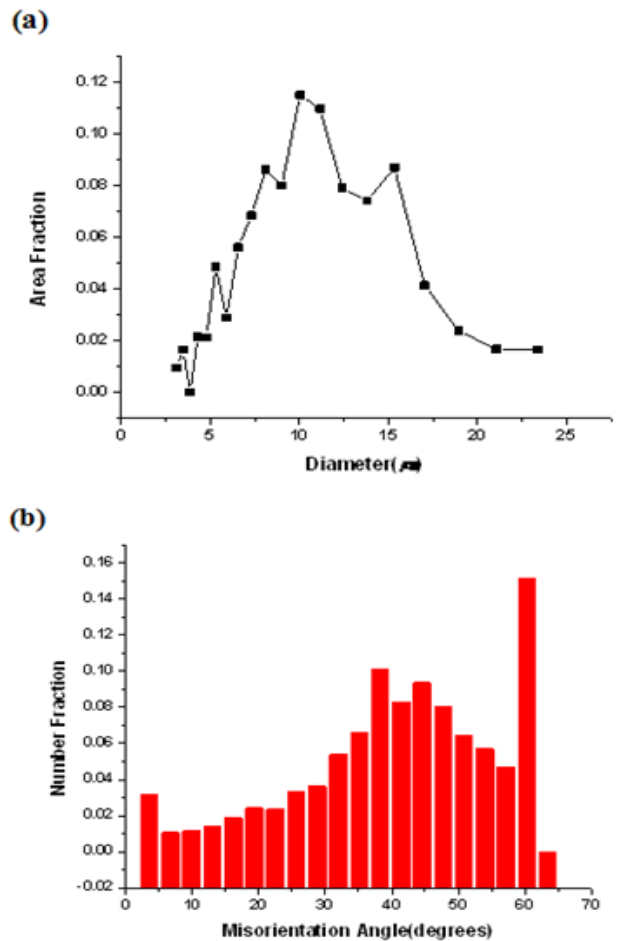


Fig. 8 Distribution chart of (a) grain size and (b) misorientation angle with 7Mn-0.5Ni alloy annealed at 950 °C

그림 8은 7Mn-0.5Ni 합금 시험편의 950 °C 어닐링 열처리 온도에서 EBSD 분석을 통하여 얻어진 결정립 크기 및 방위각 차이 측정값에 대한 분포를 나타내고 있다. 시험편에서 20개의 데이터를 평균하여 결정립 크기와 방위각 차이의 분포를 계산하였다.

Table 3 Relation between pitting potential and misorientation angle, grain size of 7Mn-0.5Ni alloy annealed at various temperatures

Annealing Temperature(°C)	750	950	1100
Grain Size(μm)	7.69	10.6	28.7
Misorientation Angle	24.09	41.12	27.35
Pitting Potential(mV)	138	451	269

표 3은 다양한 어닐링 열처리 온도(750 °C 950 °C 1100 °C)에서 7Mn-0.5Ni 합금의 공식전위를 측정 후 동일한 시험편을 이용하여 EBSD 분석을 한 결과를 나타내고 있다. 결정립 크기는 어닐링 온도가 증가함에 따라 증가하였으며 방위각 차이는 어닐링 온도가 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 공식전위는 어닐링 온도가 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 실험 결과에서 주목할 점은 공식전위와 방위각 차이의 관계이다.

어닐링 온도 950 °C에서 방위각 차이가 41.02°로 최대이며 공식전위도 451 mV로 최대를 나타내고 있다. 즉 방위각 차이와 공식전위는 양의 상관관계를 가지며 입계 에너지가 방위각의 함수¹⁰⁾인 것을 볼 때 공식전위는 입계 에너지와 밀접한 상관관계를 가진다는 것을 알 수 있다.

계면 확산과 계면 에너지에 관한 대부분의 연구는 Mullins model 과 관련이 있다.^{11,12)} 이 모델에 의하면 동일한 표면 에너지에서 사이각(θ)이 클수록 입계 에너지가 증가한다고 하였다. 그들이 순금속에서 측정된 값에 의하면 용점 근처에서 여러 표면의 평균 표면 에너지와 원자간 결합 에너지는 양의 상관관계를 가진다고 하였다. 다시 말해서, 표면 에너지, 입계 에너지 그리고 원자간 결합 에너지가 서로 양의 상관관계를 가지며 이러한 실험적 사실들을 바탕으로 공식전위에 영향을 미치는 다른 요인을 추론할 수 있다.

원자간 결합에너지와 공식전위와의 관계는

Wranglen¹³⁾의 연구결과에 의해서도 추론할 수 있다. 그는 원자간 결합에너지(ε)가 클수록 공식저항성은 우수하며 공식전위도 크게 된다고 하였다. 앞서 언급한, ε와 입계에너지의 관계를 통해 입계에너지와 공식전위 상호간에 양의 상관관계를 추론할 수 있으며 이것은 본 연구에서 EBSD 분석을 통한 실험결과와 일치하였다. 표 3으로 부터 시험편에서 방위각의 차이와 공식전위가 밀접한 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있다. 입계에너지가 방위각의 함수인 것을 고려한다면 입계에너지와 공식전위가 양의 상관관계에 있다¹⁰⁾. 공식전위와 입계에너지, 표면 에너지의 관계를 보다 명확히 고찰하기 위해서는 다양한 온도에서 추가적인 EBSD 분석과 동전위분극실험을 통한 공식전위 측정이 필요하며 본 연구결과에서도 나타내는 바와 같이 공식전위는 적절한 α/γ 상분율을 가졌을 때 최대가 되며 또한 어닐링 후 각 결정립의 방위각 차이가 클수록 높은 공식전위를 나타내었다. 이는 Mullin 모델에서 입계에너지와 표면 에너지가 공식전위에 영향을 주었기 때문이라고 판단 된다.

4. 요약 및 결론

내식성이 우수한 저가의 22Cr lean 듀플렉스 스테인리스강을 개발하기 위해 Mn 과 Ni 원소의 첨가 영향을 조사하였다.

- 어닐링 온도가 올라갈수록 α 페라이트 상분율은 증가하며 γ 오스테나이트 상분율은 감소하였다. 이것은 ThermoCalc program에서 나타난 온도변화에 따른 각 상들의 평형 몰분율의 변화와 일치하였다.
- 본 연구결과에 의해 Mn의 효과에 대해 $[Ni]_{eq}$ 식을 수정 정리하였으며 그 결과 $[Ni]_{eq}$ 식은 아래와 같이 표현된다.

$$[Ni]_{eq} = [Ni] + 30 \times [C + N] + 0.4 \times [Mn]$$

- 각 강종에서 가장 높은 공식전위(pitting potential)를 나타내는 어닐링 온도 조건이 시험편마다 다르며 공식전위는 2Ni-4Mn 강을 제외한 모든 강에서 44~46 %의 α 상분율을 가질 때 공식전위가 최대로 나타났다.
- 공식(pits)은 α 와 γ 결정립계 또는 α/γ 상경계에서 주로 발생하며, 방위각 차이가 증가함에 따라 증가되었다. 방위각 차이가 클수록 입계에너지가 증가하고 공식전위도 증가한다.

5. 참고문헌

1. Robert N Gunn, 1997, "Duplex stainless steels 1st ed", Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, pp. 1-6.
2. J.M.SYKES, 1996, "The effect of phase compositions on the pitting corrosion of 25Cr duplex stainless steel in chloride solutions", Corrosion Science, Vol.38, No.8, pp. 1319-1330.
3. J.B. Lee, 2004, "Standardization of Critical Pitting Temperature Measurement by Electrochemical Testing Method", Kookmin University, Seoul, pp. 7-11.
4. Masanori Onozuka, 1998, "Low-activation Mn -Cr austenitic stainless steel with further reduced content of long-lived radioactive elements", Journal of Nuclear Materials, Vol.255, No.2, pp. 129.
5. R.Merello, 2003, "Influence of chemical composition on the pitting corrosion resistance of non-standard low-Ni high-Mn - N duplex stainless steels", Corrosion Science, Vol.45, No.5, pp. 909-921.
6. Kim, H. J., Lee, H. W, Lee, J. M. and C. Y. Kang, 2006, "Effect of Grain Size on Corrosion Resistance and High Temperature Oxidation Behavior of 22Cr-15Ni-5W Super Austenitic Stainless Steels", the Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 51-57.
7. K.J. Park, 2005, "Effects of Manganese on the passivity of Fe-18Cr-xMn(x=0, 6, 12)", Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, pp. 32-40.
8. Hua Tan and Yiming Jiang, 2009, "Effect of annealing temperature on the pitting corrosion resistance of super duplex stainless steel UNS S32750", MATERIALS CHARACTERIZATION, Vol.60, No.9, pp. 1049-1054.
9. Y.S Ahn, J.M Kim and B.H Jeong, 2002, "Effect of aging treatment and microstructural evolution on corrosion resistance of W substituted 2205 duplex stainless steel", Material Science and Technology, Vol.18, pp. 1-7.
10. S.K Hwang, 2007, "Trends in Improving the Structural Materials Properties of Titanium-based Alloys", The National Academy of Science, Natural Science, Vol.46, No.2, pp. 1-29.
11. L.KLINGER and E.RABKIN, 2001, "Effects of surface anisotropy on grain boundary grooving", INTERFACE SCIENCE, Vol.9, pp. 55-63.
12. W.W.Mullins, 1957, "Theory of thermal grooving, J.Appl.Phys. Vol.28, pp. 333-339.
13. G. Wranglen, 1974, "The influence of non-metallic inclusion nature and shape on the pitting corrosion susceptibility of 18Cr-9Ni and 17Cr-11Ni-2Mo austenitic stainless steels" Corrosion Science, Vol.14, pp. 331.